

DEPLEÇÃO DO FÓSFORO INORGÂNICO DE DIFERENTES FRAÇÕES PROVOCADA PELA EXTRAÇÃO SUCESSIVA COM RESINA EM DIFERENTES SOLOS E MANEJOS⁽¹⁾

D. S. RHEINHEIMER⁽²⁾, I. ANGHINONI⁽³⁾ & J. KAMINSKI⁽²⁾

RESUMO

O fósforo disponível no solo é equilibrado por formas menos lábeis, as quais, a longo prazo, podem-se tornar potencialmente disponíveis às plantas. O trabalho teve por objetivo (a) avaliar a depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina e (b) efetuar um balanço do fósforo no solo. Coletaram-se amostras de solo (Latosolo Vermelho distrófico típico, Latossolo Vermelho distrófico típico e Argissolo Vermelho distrófico típico), em três camadas (0-2,5, 2,5-7,5 e 7,5-17,5 cm), de quatro experimentos de longa duração, nos sistemas plantio direto e cultivo convencional com diferentes sucessões de culturas. Efetuou-se o fracionamento do fósforo inorgânico pela técnica de Hedley modificada, antes e depois das extrações sucessivas do fósforo com resina em membrana. A fração de fósforo inorgânico extraída com HCl 1,0 mol L⁻¹ foi indisponível, enquanto as frações de fósforo inorgânico extraídas com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ e NaOH 0,1 mol L⁻¹ foram lábeis, independentemente do tipo de solo, método de preparo e sucessão de cultura. Nos Latossolos, a fração de fósforo inorgânico extraída pelo NaOH 0,5 mol L⁻¹ também foi lábil.

Termos de indexação: fósforo no solo, formas lábeis, fator quantidade.

⁽¹⁾ Trabalho realizado com apoio financeiro do PRONEX-FINEP e FAPERGS. Recebido para publicação em junho de 1999 e aprovado em fevereiro de 2000.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Caixa Postal 221, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: Danilo@ceta.ccr.ufsm.br; kaminski@ceta.ccr.ufsm.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq.

SUMMARY: *DEPLETION OF INORGANIC PHOSPHORUS FRACTIONS BY SUCCESSIVE EXTRACTION WITH RESIN IN DIFFERENT SOILS AND MANAGEMENT SYSTEMS*

Available soil phosphorus is maintained by less labile form that, in the long term, can become available to the plants. The aim of this research was to determine the depletion of various inorganic phosphorus fractions after successive extraction with resin. Soil samples were collected in four long-term experiments under no tillage or conventional tillage systems with different crop sequence. The soils (heavy clay Rhodic Hapludox, clay Rhodic Hapludox and clay loam Rhodic Paleudult) were collected from three depths, 0-2.5, 2.5-7.5 and 7.5-17.5 cm. Inorganic phosphorus was fractioned by a modified Hedley technique before and after successive phosphorus extraction by membrane resin. The fraction of phosphorus extracted with $1.0 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl}$ is not labile. Those extracted with $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ and $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaOH}$ can be considered labile, regardless the soil type, method of cultivation and crop sequence. In the Oxisols, the inorganic phosphorus fraction extracted by $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaOH}$ is also labile.

Index terms: soil phosphorus, labile forms, quantity factor.

INTRODUÇÃO

Uma abordagem moderna para a compreensão da dinâmica do fósforo é dividi-lo em frações, pelo uso de soluções extratoras de diferentes composições e capacidades de extração, dada a complexidade do comportamento desse elemento no solo (Silva & Raij, 1999). A primeira tentativa de fracionamento foi proposta em 1937 (Dean, 1937), pelo uso de extrações sequenciais alcali e ácido. Mais tarde, Chang & Jackson (1957) aprimoraram o método, introduzindo outros extratores, com vistas em separar as frações por eles identificadas como Pi-Al, Pi-Fe, Pi-Ca e Pi-Fe redutor. No entanto, esse procedimento pode apresentar problemas de interpretação dos resultados, pois ocorrem readsorção durante a extração e hidrólise do fósforo orgânico. Mais recentemente, Hedley et al. (1982) propuseram uma técnica capaz de dimensionar as diferentes frações orgânicas e inorgânicas do solo de acordo com sua biodisponibilidade, independentemente do grau de intemperismo e dos sistemas de cultivo empregados (Hedley et al., 1982; Agbenin & Tiessen, 1994; Beck & Sanches, 1994; Guo & Yost, 1998). Hedley et al. (1982) e Tiessen et al. (1984) consideraram as formas extraídas por resina trocadora de ânions e bicarbonato de sódio como as formas de maior disponibilidade, ou ditas lábeis. Já aquelas extraídas com $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ comporiam a fração moderadamente lábil. As frações de fósforo extraídas por ultra-som, $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$, $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e o residual, seriam consideradas não-lábeis. Isto estende-se às frações de fósforo orgânico detectadas pelos mesmos extratores.

A publicação do método de Hedley et al. (1982) é um divisor metodológico importante, pois, a partir dele, outros trabalhos têm sido realizados com solos

de regiões temperadas e, mais recentemente, alguns com solos bem intemperizados (Cross & Schlesinger, 1995). O interesse na aplicação desse método para o estudo da dinâmica do fósforo em solos das regiões tropicais e subtropicais tem aumentado e envolve, especialmente, a adição de fertilizantes (Ball-Coelho et al., 1993; Beck & Sanchez, 1994; Schmidt et al., 1996; Zhang & MacKenzie, 1997; Araújo & Salcedo, 1997; Guo & Yost, 1998) e o manejo do solo (Selles et al., 1997). Estes trabalhos demonstram que as formas mais disponíveis são tamponadas, principalmente pelo fósforo inorgânico extraído pelo $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$, o qual compõe, basicamente, o fator quantidade. A magnitude dessa fração aumenta quando as adições superam as saídas e diminui em solos cultivados com baixa reposição do fósforo exportado. O acúmulo, ou o declínio, do fósforo do solo depende do balanço entre as adições e as retiradas do sistema. O fator quantidade é monitorado pelos métodos convencionais de análise de fósforo, mas para os solos bem intemperizados há uma subestimação do seu valor, pois extrações sucessivas com o mesmo extrator continuam retirando fósforo do solo (Campello et al., 1994; McKean & Warren, 1996). Assim, o fator quantidade poderia ser mais bem monitorado tanto pela extração com $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Ball-Coelho et al., 1993; Beck & Sanchez, 1994; Schmidt et al., 1996; Araújo & Salcedo, 1997; Zhang & MacKenzie, 1997; Guo & Yost, 1998) como pela extração sucessiva com resina trocadora de ânions (Haggar et al., 1991; Campello et al., 1994; McKean & Warren, 1996).

Este trabalho teve por objetivo (a) avaliar a depleção nos teores de fósforo inorgânico das frações obtidas com a técnica de Hedley após extrações sucessivas com resina trocadora de ânion em membrana e (b) efetuar um balanço do fósforo no solo,

usando amostras de solos de quatro experimentos de longa duração, envolvendo diferentes métodos de preparo e sucessões de culturas.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo utilizadas neste trabalho foram coletadas de quatro experimentos de longa duração, instalados sobre três tipos de solos, com objetivo de estudar os efeitos de métodos de preparo do solo e de sistemas de culturas na recuperação da qualidade do solo.

O primeiro experimento foi instalado, em 1979, num Latossolo Vermelho distroférico típico muito argiloso substrato basalto (LVdf – Rhodic Hapludox) no Centro de Atividades Agrícolas e Florestais da Cooperativa Triticola de Santo Ângelo (RS). A área tinha sido anteriormente cultivada por 15 anos em cultivo convencional e apresentava avançado estado de degradação física. Na instalação do experimento, em 1985, e, posteriormente, em 1992, aplicou-se calcário na dose para elevar o pH até 6,0 (método SMP). A adubação usada a partir da instalação do experimento seguiu a recomendação técnica específica a cada cultura. As amostras de solo foram coletadas nas parcelas do sistema plantio direto (SPD) e nas do cultivo convencional (SCC), com as sucessões de culturas aveia (*Avena strigosa* Scrb)/milho (*Zea mays* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merrill). No SPD, coletaram-se amostras, também, das parcelas com a rotação envolvendo as culturas: trigo, soja, tremoço (*Lupinus angustifolium* L.), milho, sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e aveia preta + trevo (*Trifolium repens* L.). As amostras de solo foram coletadas nas parcelas que nunca receberam adubação nitrogenada, na expectativa de que maior quantidade de fósforo seria acumulada no solo, uma vez que a exportação pelas colheitas era menor. Maiores detalhes podem ser obtidos em Dalla Rosa (1981), Merten (1988) e Dalla Rosa et al. (1991).

O segundo experimento foi instalado, em 1983, num Latossolo Vermelho distrófico típico argiloso substrato basalto (LVd - Rhodic Hapludox) no Centro Nacional de Pesquisa do Trigo - EMBRAPA, em Passo Fundo (RS). As amostras foram coletadas nos tratamentos SPD e SCC e nos blocos cultivados com sorgo e soja, de uma seqüência de culturas alternadas no tempo, envolvendo ervilhaca (*Vicia sativa* L.), milho, sorgo, aveia preta, soja e cevada (*Hordeum vulgare* L.). O calcário foi aplicado na instalação do experimento e reaplicado, em 1989, com incorporação ao solo, na dose recomendada para elevação o pH até 6,0 e a adubação usada seguiu as recomendações técnicas. Maiores detalhes podem ser obtidos em Selles et al. (1997) e Denardin & Kochhann (1998).

O terceiro experimento foi instalado, em 1983, num Argissolo Vermelho distrófico franco-argiloso arenoso (Pvd – Rhodic Paleudult) degradado fisicamente, em Eldorado do Sul (RS), pelo Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Amostrou-se o solo das parcelas sem nitrogênio e solo descompactado, nas sucessões de culturas aveia/milho, aveia + ervilhaca/milho + caupi (*Vigna unguiculata* subs *unguiculata* (L.) Walp) e guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millps) + milho, sob SPD.

O quarto experimento foi instalado, em 1985, em área adjacente ao experimento descrito anteriormente. O solo foi amostrado nos tratamentos SPD e SCC nas sucessões de culturas aveia/milho e aveia + ervilhaca/milho + caupi, sem aplicação de nitrogênio. Maiores detalhes podem ser obtidos em Testa (1989), Bayer (1992) e Amado et al. (1999).

Em maio de 1997, logo após o preparo, coletaram-se amostras de solo nos quatro experimentos, em duas repetições de cada tratamento, nas profundidades de 0-2,5, 2,5-7,5 e 7,5-17,5 cm. Cada amostra foi composta pela homogeneização de duas subamostras oriundas de trincheiras de 50 x 10 x 17,5 cm, coletadas perpendicularmente às linhas de semeadura. O solo foi seco ao ar e peneirado em malha de 1 mm.

Para o fracionamento do fósforo inorgânico, usou-se o método de Hedley et al. (1982) (resina, NaHCO_3 0,5 mol L⁻¹, NaOH 0,1 mol L⁻¹, HCl 1,0 mol L⁻¹ e $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$), com inclusão de uma extração inicial com resina trocadora de ânion em membrana (AR 103 QDP 434 - Ionics, Inc.) e uma segunda extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹, após o ácido clorídrico (Condron et al., 1985). O fósforo inorgânico dos extratos foi determinado, usando-se o procedimento descrito por Dick & Tabatabai (1977).

O fósforo potencialmente lábil foi estimado pela extração sucessiva com resina trocadora de ânion em membrana (McKean & Warren, 1996). Este procedimento consistiu em pesar 0,500 g de solo, colocando-o em tubo de centrifuga com tampa com rosca. Adicionaram-se 30 mL de água destilada e uma membrana (1,5 x 5,0 cm) de resina saturada com NaHCO_3 0,5 mol L⁻¹. Agitou-se o material por 16 horas no agitador sem fim. No final deste período, as membranas de resina foram lavadas com jato de água destilada e colocadas em frascos "snap-cap" com 50 mL de HCl 0,5 mol L⁻¹. As membranas de resina permaneceram nesta solução por 90 min e depois foram agitadas por 30 min (horizontal, 100-120 oscilações/min). O teor de fósforo contido no extrato foi determinado de acordo com Murphy & Riley (1962). Repetiu-se a extração por onze vezes, para que o teor de fósforo extraído fosse próximo de zero. O solo permanecia em repouso, saturado com água, por um período de 4 a 17 dias entre cada extração. No resíduo, procedeu-se ao fracionamento do fósforo inorgânico, usando os mesmos extratores adicionados nas amostras não submetidas à extração sucessiva com resina.

Realizou-se um balanço do fósforo para o Latossolo Vermelho distroférrico típico. O fósforo total adicionado foi calculado com base na dose aplicada em cada cultivo e o número de cultivos; o fósforo exportado foi calculado com base na produtividade média de cada cultura obtida nos referidos tratamentos, no número de cultivos e no teor médio de fósforo nos grãos. Para estimar o fósforo perdido por erosão, considerou-se o teor de fósforo total do solo em cada tratamento e pressupôs-se uma perda média de solo de 1 e 3 t ha⁻¹ ano⁻¹, para o SPD e SCC, e uma taxa de enriquecimento de 2 e 1,5 mg dm⁻³ de P no sedimento por mg dm⁻³ de P no solo, para os mesmos sistemas (Senganfredo, 1995). O fósforo potencialmente disponível foi obtido pelo somatório das extrações sucessivas com resina em membrana. A diferença entre o fósforo adicionado e aquele exportado pelos grãos, perdido por erosão e que permaneceu no solo potencialmente disponível, foi considerada como fósforo recuperado.

Os valores de fósforo extraído pelo NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹, NaOH 0,1 e 0,5 mol L⁻¹ e HCl 1,0 mol L⁻¹ foram submetidos à análise de variância, para cada solo separadamente, considerando os métodos de

preparo, as sucessões de culturas, as camadas amostradas e os teores obtidos antes e depois das extrações sucessivas com a resina em membrana. As médias, antes e depois das extrações sucessivas com a resina em membrana, dos tratamentos dos métodos de preparo, sucessões de culturas e camadas amostradas foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Nos três primeiros experimentos, consideraram-se, como parcelas principais, os métodos de preparo do solo e, como subparcelas, os sistemas de culturas. No quarto experimento, só foram considerados os sistemas de culturas. As camadas amostradas foram consideradas como tratamentos, com restrição à aleatorização.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de fósforo inorgânico extraído pelo NaHCO₃ diminuiu ($p < 0,05$) nos quatro experimentos após as extrações sucessivas com a resina em membrana, comparativamente ao seu valor inicial. Cabe salientar que os valores antes considerados (Quadro 1) referem-se, na verdade, aos obtidos após

Quadro 1. Fósforo extraído pelo NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ antes e depois das extrações sucessivas com resina trocadora de ânion em membrana, considerando diferentes tipos de solo, métodos de preparo, sucessões de culturas e camadas amostradas

Solo	Preparo	Sucessão	Camada amostrada (cm)						Tukey (p < 0,05)	C.V.
			0-2,5		2,5-7,5		7,5-17,5			
			Antes ⁽⁴⁾	Após ⁽⁴⁾	Antes	Após	Antes	Após		
mg dm ⁻³									%	
LVdf ⁽¹⁾	SPD ⁽²⁾	A/M ⁽³⁾	38	10	39	12	33	13	11,5 ⁽⁵⁾	25,2
		T/S	39	13	34	13	33	8		
		Rotação	54	10	31	11	28	7		
	SCC	A/M	27	12	32	16	30	15		
		T/S	28	12	33	10	27	8		
LVd	SPD	Sorgo	44	19	47	18	22	10	9,8	28,0
		Soja	48	20	46	21	33	16		
	SCC	Sorgo	21	9	22	11	18	8		
		Soja	18	8	22	11	18	8		
PVd 1	SPD	A/M	54	16	29	12	16	4	11,3	30,7
		A + V/M + C	38	18	29	12	15	3		
	SCC	A/M	34	10	32	9	21	7		
		A + V/M + C	21	8	21	8	15	3		
PVd 2	SPD	A/M	29	11	16	7	10	1	7,5	25,9
		A + V/M + C	33	9	15	5	13	3		
		G + M	39	7	34	6	21	3		

⁽¹⁾ LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico típico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico. ⁽²⁾ SPD = sistema plantio direto e SCC = sistema de cultivo convencional. ⁽³⁾ A/M = aveia preta/milho; T/S = trigo/soja; Rotação = inverno (trigo, tremoço, colza e aveia preta + trevo) e verão (milho e soja); Sorgo e Soja = sorgo e soja antecedendo a coleta do solo; A + V/M + C = aveia preta + ervilhaca/milho + caupi; G + M = guandu + milho. ⁽⁴⁾ Teores antes (após uma extração) e depois das outras extrações sucessivas com resina em membrana. ⁽⁵⁾ Valor utilizado para comparação das médias antes e depois das extrações sucessivas com resina em membrana.

uma extração com resina e, como aproximadamente 50% do total é retirado na primeira extração, pode-se inferir que os teores, sem extração prévia com a resina, do Pi-NaHCO_3 seriam mais elevados. Assim mesmo, os teores, médias dos métodos de preparo de solo, sucessões de culturas e camadas amostradas diminuiriam de 34 para 11, de 30 para 13, de 27 para 9 e de 23 para 6 mg dm^{-3} , para o 1º, 2º, 3º e 4º experimentos, respectivamente (Quadro 1), confirmando a labilidade dessa fração, a qual contribui para o tamponamento do fósforo potencialmente disponível à biomassa, independentemente do tipo de solo, método de preparo, sucessão de cultura e camada amostrada.

Por outro lado, o teor de fósforo extraído pelo HCl 1,0 mol L^{-1} , usado em sequência à resina, NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} e NaOH 0,1 mol L^{-1} , não se modificou ($p < 0,05$) com as extrações sucessivas com resina em membrana (Quadro 2). Essa fração representa média dos métodos de preparo de solo, sucessões de culturas e camadas amostradas, 32, 23, 19 e 22 mg dm^{-3} , para o 1º, 2º, 3º e 4º experimentos, respectivamente (Quadro 2) e é considerada não lábil, estável ou refratária (Hedley et al., 1982;

Tiessen et al., 1984). Possivelmente, é composta por fosfatos de cálcio neoformados a partir da precipitação na solução do solo, decorrente da alta concentração de fósforo e cálcio (Magid, 1993). O fósforo contido nessa fração só se tornará disponível no solo se ocorrer um abaixamento do pH e, ou, dos teores de fósforo e de cálcio em solução, o que pode ser observado na região da rizosfera (Smiley, 1974).

O teor de fósforo extraído pelo NaOH 0,1 mol L^{-1} diminuiu substancialmente após as extrações sucessivas com resina em membrana, sendo significativo ($p < 0,05$) para a maioria dos tratamentos (Quadro 3). Em média, os teores diminuiram de 139 para 99, de 273 para 156, de 158 para 97 e de 160 para 115 mg dm^{-3} , para o 1º, 2º, 3º e 4º experimentos, respectivamente. Portanto, essa fração de fósforo inorgânico é principal tamponante do fósforo potencialmente disponível. No LVdf e LVd, cujos teores de argila (680 e 530 g kg^{-1}) e óxidos de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (246 e 56 g kg^{-1}) são muito maiores comparativamente aos do Argissolo (220 g kg^{-1} de argila e 36 g kg^{-1} de Fe_d), a quantidade de fósforo extraída com o NaOH 0,5 mol L^{-1} , também, diminuiu de 149 para 97 e de

Quadro 2. Fósforo extraído pelo HCl 1,0 mol L^{-1} antes e depois das extrações sucessivas com resina trocadora de ânion em membrana, considerando diferentes tipos de solo, métodos de preparo, sucessões de culturas e camadas amostradas

Solo	Preparo	Sucessão	Camada amostrada (cm)						Tukey (p < 0,05)	C.V.
			0-2,5		2,5-7,5		7,5-17,5			
			Antes ⁽⁴⁾	Após ⁽⁴⁾	Antes	Após	Antes	Após		
mg dm ⁻³										%
LVdf ⁽¹⁾	SPD ⁽²⁾	A/M ⁽³⁾	31	37	26	36	15	31	14,6 ⁽⁵⁾	24,9
		T/S	50	51	32	30	14	19		
		Rotação	49	43	28	37	13	29		
	SCC	A/M	23	26	27	25	18	30		
		T/S	23	26	27	35	12	26		
LVd	SPD	Sorgo	64	58	50	38	29	20	19,9	30,1
		Soja	54	45	50	40	40	33		
	SCC	Sorgo	20	15	23	17	21	16		
		Soja	25	18	29	21	30	23		
PVd 1	SPD	A/M	62	59	34	30	16	13	12,7	24,6
		A + V/M + C	54	46	31	24	10	9		
	SCC	A/M	23	21	22	20	17	22		
		A + V/M + C	19	15	21	15	13	13		
PVd 2	SPD	A/M	33	31	21	20	13	9	12,7	26,5
		A + V/M + C	34	28	25	20	15	15		
		G + M	41	36	28	25	15	17		

⁽¹⁾ LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico típico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico. ⁽²⁾ SPD = sistema plantio direto e SCC = sistema de cultivo convencional. ⁽³⁾ A/M = aveia preta/milho; T/S = trigo/soja; Rotação = inverno (trigo, tremoço, colza e aveia preta + trevo) e verão (milho e soja); Sorgo e Soja = sorgo e soja antecedendo a coleta do solo; A + V/M + C = aveia preta + ervilhaca/milho + caupi; G + M = guandu + milho. ⁽⁴⁾ Teores antes (após uma extração) e depois das outras extrações sucessivas com resina em membrana. ⁽⁵⁾ Valor utilizado para comparação das médias antes e depois das extrações sucessivas com resina em membrana.

Quadro 3. Fósforo extraído pelo NaOH 0,1 mol L⁻¹ antes e depois das extrações sucessivas com resina trocadora de ânion em membrana, considerando diferentes tipos de solo, métodos de preparo, sucessões de culturas e camadas amostradas

Solo	Preparo	Sucessão	Camada amostrada (cm)						Tukey (p < 0,05)	C.V.
			0-2,5		2,5-7,5		7,5-17,5			
			Antes ⁽⁴⁾	Após ⁽⁴⁾	Antes	Após	Antes	Após		
mg dm ⁻³										
LVdf ⁽¹⁾	SPD ⁽²⁾	A/M ⁽³⁾	138	84	168	80	144	94	34,4 ⁽⁵⁾	14,2
		T/S	133	81	130	105	124	93		
		Rotação	143	102	141	110	118	102		
	SCC	A/M	126	89	160	119	148	98		
		T/S	133	108	162	125	122	103		
LVd	SPD	Sorgo	371	198	351	195	293	157	49,4	11,3
		Soja	322	153	339	172	280	162		
	SCC	Sorgo	225	147	250	156	242	141		
		Soja	207	123	198	140	196	131		
PVd 1	SPD	A/M	203	116	171	104	123	83	29,2	11,3
		A + V/M + C	174	110	156	98	112	80		
	SCC	A/M	186	112	183	113	168	97		
		A + V/M + C	144	88	153	93	120	71		
PVd 2	SPD	A/M	186	115	160	101	137	99	33,5	12,0
		A + V/M + C	199	114	164	102	125	90		
		G + M	173	153	155	142	143	122		

⁽¹⁾ LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico típico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico. ⁽²⁾ SPD = sistema plantio direto e SCC = sistema de cultivo convencional. ⁽³⁾ A/M = aveia preta/milho; T/S = trigo/soja; Rotação = inverno (trigo, tremoço, colza e aveia preta + trevo) e verão (milho e soja); Sorgo e Soja = sorgo e soja antecedendo a coleta do solo; A + V/M + C = aveia preta + ervilhaca/milho + caupi; G + M = guandu + milho. ⁽⁴⁾ Teores antes (após uma extração) e depois das outras extrações sucessivas com resina em membrana. ⁽⁵⁾ Valor utilizado para comparação das médias antes e depois das extrações sucessivas com resina em membrana.

109 para 90 mg dm⁻³, para o LVdf e LVd, respectivamente (Quadro 4), representando um potencial de disponibilidade. Isso mostra que, em qualquer tipo de solo ou manejo empregado, as frações extraídas com NaOH foram as que mais contribuíram no tamponamento do fósforo disponível, como também fora observado em outros trabalhos (Ball-Coelho et al., 1993; Beck & Sanchez, 1994; Schmidt et al., 1996; Zhang & MacKenzie, 1997; Araújo & Salcedo, 1997; Guo & Yost, 1998; Selles et al., 1997).

Desse modo, o fósforo inorgânico extraído pelo NaOH (0,1 e 0,5 mol L⁻¹) foi o principal tamponante do fator quantidade, estimado pelas extrações sucessivas com a resina, representando, em média, 85, 85, 76 e 69%, para o 1º, 2º, 3º e 4º experimentos, respectivamente. O Pi-NaHCO₃ contribuiu com 20, 10, 22 e 26% para os referidos experimentos, enquanto o Pi-HCl não é importante para o fator quantidade (Quadro 5).

Os métodos de análise para fósforo disponível do solo em uso no Brasil extraem uma pequena porção do “pool” do fósforo total do solo. Esses apresentam moderada correlação com a quantidade de fósforo

absorvida pela planta (Kroth, 1998; Silva & Raij, 1999), pois as taxas de dessorção são, na maioria dos casos, desconsideradas no planejamento das adubações. A capacidade preditiva dos métodos de análise poderia ser melhorada, combinando-se os resultados obtidos pelo método usual à estimativa do fósforo potencialmente disponível, ou àquelas formas que o tamponam. No caso de solos com elevado grau de intemperização e que tenham recebido adubação durante vários ciclos de cultivo, poder-se-ia medir a fração de fósforo inorgânico potencialmente biodisponível, solúvel em NaOH, o que representaria mais adequadamente o fator quantidade. Tal procedimento poderia melhorar as práticas de adubação fosfatada nas diferentes situações de manejo, tipos de solo e espécies cultivadas (Sanyal & Datta, 1991; Guo & Yost, 1998).

Os solos dos experimentos utilizados neste trabalho foram anteriormente cultivados por vários anos de modo convencional e receberam adubações fosfatadas em todos os cultivos durante sua condução. A partir dos dados experimentais obtidos no solo LVdf e de algumas pressuposições, como as mencionadas no Material e Métodos, elaborou-se uma estimativa do balanço de fósforo (Quadro 6).

Quadro 4. Fósforo extraído pelo NaOH 0,5 mol L⁻¹ antes e depois das extrações sucessivas com resina trocadora de ânion em membrana, considerando diferentes tipos de solo, métodos de preparo, sucessões de culturas e camadas amostradas

Solo	Preparo	Sucessão	Camada amostrada (cm)						Tukey (p < 0,05)	C.V.
			0-2,5		2,5-7,5		7,5-17,5			
			Antes ⁽⁴⁾	Após ⁽⁴⁾	Antes	Após	Antes	Após		
mg dm ⁻³										%
LVdf ⁽¹⁾	SPD ⁽²⁾	A/M ⁽³⁾	150	110	152	102	134	94	22,7 ⁽⁵⁾	9,1
		T/S	172	121	164	93	126	83		
		Rotação	171	104	160	105	119	88		
	SCC	A/M	127	86	157	102	147	93		
		T/S	151	89	171	100	138	87		
LVd	SPD	Sorgo	120	101	118	103	111	86	11,3	5,6
		Soja	124	105	128	102	118	105		
	SCC	Sorgo	94	76	100	80	101	77		
		Soja	93	80	104	83	102	85		
PVd 1	SPD	A/M	74	71	62	61	53	54	8,0	7,2
		A + V/M + C	68	71	59	55	45	45		
	SCC	A/M	55	48	55	50	55	49		
		A + V/M + C	50	47	55	49	49	44		
PVd 2	SPD	A/M	81	77	67	65	46	52	15,4	11,4
		A + V/M + C	67	64	65	65	61	59		
		G + M	81	79	73	69	62	61		

⁽¹⁾ LVdf = Latossolo Vermelho distroférico típico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico. ⁽²⁾ SPD = sistema plantio direto e SCC = sistema de cultivo convencional. ⁽³⁾ A/M = aveia preta/milho; T/S = trigo/soja; Rotação = inverno (trigo, tremoço, colza e aveia preta + trevo) e verão (milho e soja); Sorgo e Soja = sorgo e soja antecedendo a coleta do solo; A + V/M + C = aveia preta + ervilhaca/milho + caupi; G + M = guandu + milho. ⁽⁴⁾ Teores antes (após uma extração) e depois das outras extrações sucessivas com resina em membrana. ⁽⁵⁾ Valor utilizado para comparação das médias antes e depois das extrações sucessivas com resina em membrana.

Quadro 5. Fator quantidade de fósforo e contribuição de cada extrator à variação nesse fator em diferentes tipos de solo

Solo ⁽¹⁾	Unidade	Fator quantidade ⁽³⁾	$\Delta \text{NaHCO}_3^{(4)}$ 0,5 mol L ⁻¹	ΔHCl 1,0 mol L ⁻¹	ΔNaOH 0,1 mol L ⁻¹	ΔNaOH 0,5 mol L ⁻¹	$\Sigma \Delta^{(5)}$
LVdf	mg dm ⁻³	97	21	- 6	39	52	106
	% ⁽²⁾		20	- 6	36	49	
LVd	mg dm ⁻³	122	17	7	117	19	160
	%		10	5	72	13	
PVd 1	mg dm ⁻³	54	18	2	61	3	83
	%		22	2	73	3	
PVd 2	mg dm ⁻³	51	17	3	45	1	66
	%		26	5	68	1	

⁽¹⁾ LVdf = Latossolo Vermelho distroférico típico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico. ⁽²⁾ Percentual em relação ao somatório das diferenças antes e após a extração sucessiva com resina em membrana. ⁽³⁾ Fator quantidade, ou fósforo potencialmente disponível, obtido por extração sucessiva com resina em membrana. Média para métodos de preparo de solo, sucessões de culturas e camadas amostradas. ⁽⁴⁾ Diferença entre os teores de fósforo antes e depois das extrações sucessivas com resina em membrana. ⁽⁵⁾ Somatório das diferenças.

No SPD, a sucessão trigo/soja, por ter sido adubada duas vezes ao ano, apresentou quantidade de fósforo total adicionada elevada, 792 kg ha⁻¹. Destes, 374 kg ha⁻¹ foram exportados pelos grãos, representando 47% do total; 40 kg ha⁻¹ foram perdidos por erosão (5%) e 213 kg ha⁻¹ permaneceram no solo em formas potencialmente disponíveis, representando 27% do fósforo aplicado. Assim, apenas 21% daquele fósforo aplicado passou para formas de fósforo não-lábil, provavelmente como fosfato de cálcio de baixa solubilidade (Magid, 1993; Rheinheimer et al., 1999). Na sucessão aveia/milho, adicionaram-se 612 kg ha⁻¹ de fósforo, tendo sido 276 kg ha⁻¹ (45%) exportados pelos grãos, 40 kg ha⁻¹ (6%) saído do solo por erosão e 230 kg ha⁻¹ (38%) estão em formas potencialmente disponíveis. Nessa sucessão, somente 11% do fósforo total adicionado não foi recuperado durante os dezoito anos de cultivo. A rotação de culturas, por ter menos cultivos adubados, recebeu 552 kg ha⁻¹ de fósforo. Como as produtividades médias das gramíneas (trigo e milho) foram maiores do que nas sucessões, a quantidade exportada subiu para

316 kg ha⁻¹ (57%). A quantidade de fósforo que permaneceu no solo em formas potencialmente disponíveis foi de 170 kg ha⁻¹ (31%), que, juntamente com os 40 kg ha⁻¹ (7%) de fósforo perdido por erosão, resultou numa recuperação de 95% do fósforo adicionado. A recuperação do fósforo adicionado foi a mesma para o SCC, atingindo 79 e 89% nas sucessões trigo/soja e aveia/milho, respectivamente (Quadro 6).

Esses dados indicam que, em solos que foram adubados por vários anos, como a maioria dos solos hoje cultivados no SPD, o fósforo que não é exportado pelas colheitas permanece no solo em formas potencialmente disponíveis, uma vez que as perdas por erosão são pequenas e os sítios de adsorção de fosfatos com maior energia já estão saturados, como também observaram Guo & Yost (1998). Adicionalmente, sistemas de cultivos que envolvem culturas que não exportam grãos e com maior habilidade de reciclagem de fósforo, como, por exemplo, a aveia, podem aumentar a percentagem de recuperação dos fertilizantes fosfatados aplicados.

Quadro 6. Balanço do fósforo no Latossolo Vermelho distroférico típico nos sistemas de cultivo convencional e plantio direto cultivado com as sucessões trigo/soja, aveia/milho e rotação de cultura

Preparo sucessão	Cultura	Número de cultivos	P adicionado		Produtividade média	Teor de P no grão	P exportado	Perda por erosão ⁽³⁾	P ⁽⁴⁾ disponível	P ⁽⁵⁾			
			Cultivo	Total						Recuperado		Não recuperado	
SCC ⁽¹⁾			kg ha ⁻¹			g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%
T/S ⁽²⁾	Trigo	18	22	396	1.380	6,0	149						
	Soja	18	22	396	2.350	5,0	211						
	Somatório			792			360	89	177	626	79	166	21
A/M	Trigo	8	22	176	1.380	6,0	66						
	Soja	8	22	176	2.350	5,0	94						
	Milho	10	26	260	3.170	3,0	95						
	Somatório			612			255	89	202	546	89	66	11
SPD													
T/S	Trigo	18	22	396	1.300	6,0	140						
	Soja	18	22	396	2.600	5,0	234						
	Somatório			792			374	40	213	627	79	165	21
A/M	Trigo	8	22	176	1.300	6,0	62						
	Soja	8	22	176	2.600	5,0	104						
	Milho	10	26	260	3.670	3,0	110						
	Somatório			612			276	40	230	546	89	66	11
Rotação	Trigo	6	22	132	1.750	6,0	63						
	Soja	12	22	264	2.600	5,0	156						
	Milho	6	26	156	5.370	3,0	97						
	Somatório			552			316	40	170	526	95	26	5

⁽¹⁾ SCC = sistema cultivo convencional; SPD = sistema plantio direto. ⁽²⁾ T/S = trigo/soja desde 1979; A/M = trigo/soja até a safra 85/86 e depois aveia/milho; Rotação = soja e milho no verão e trigo, aveia, tremoço, colza e aveia + trevo no inverno. ⁽³⁾ Considerando perda de 1 e 3 t ha⁻¹ ano⁻¹ de solo e taxa de enriquecimento de 2 e 1,5 mg dm⁻³ de P no sedimento por mg dm⁻³ de P no solo para o SPD e SCC, respectivamente (Sengrañedo, 1995). ⁽⁴⁾ P disponível = extração sucessiva com resina em membrana, ponderando-se os teores e as camadas amostradas. ⁽⁵⁾ P não recuperado = P adicionado - (P exportado + P erodido + P recuperado).

CONCLUSÕES

1. A fração de fósforo inorgânico extraída com HCl 1,0 mol L⁻¹, num esquema seqüencial, foi indisponível.

2. As frações de fósforo inorgânico extraídas pelo NaHCO₃ 0,5 e NaOH 0,1 mol L⁻¹ foram fontes potenciais de fósforo biodisponível, independentemente do tipo de solo, método de preparo e sucessão de cultura, enquanto o extraído pelo NaOH 0,5 mol L⁻¹ também o foi para os Latossolos com altos teores de argila e óxidos de ferro.

3. O fator quantidade de fósforo no solo pode ser estimado pela extração com NaOH 0,1 mol L⁻¹.

4. Foram recuperados 79, 89 e 95% do fósforo adicionado no Latossolo Vermelho distroférrico típico na sucessão trigo/soja, aveia/milho e rotação de culturas, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Ao professor João Mielniczuk (UFRGS) e aos pesquisadores Rainoldo Alberto Kochhann (Embrapa – Centro Nacional de Pesquisa de Trigo), Armando Dalla Rosa e João Becker (COTRISA), pela permissão de uso das áreas experimentais as quais serviram de base para este trabalho.

LITERATURA CITADA

- AGBENIN, J.O. & TIESSEN, H. Phosphorus transformations in a toposequence of Lithosols and Cambisols from semi-arid northeastern Brazil. *Geoderma*, 62:345-362, 1994.
- AMADO, T.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B. & BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:679-686, 1999.
- ARAÚJO, M.S.B. & SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região do Nordeste. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:643-650, 1997.
- BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H. & STEWART, J.W.B. Short and long-term phosphorus dynamics in a fertilized Ultisol under sugarcane. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1027-1034, 1993.
- BAYER, C. Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996. 240 p. (Tese de Doutorado)
- BECK, M.A. & SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1424-1431, 1994.
- CAMPELLO, M.R.; NOVAIS, R.F.; FERNANDEZ, I.E.; FONTES, M.P.F. & BARROS, N.F. Avaliação da reversibilidade de fósforo não-lábil para lábil em solos com diferentes características. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:157-165, 1994.
- CHANG, S.C. & JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 84:133-144, 1957.
- CONDON, L.M.; GOH, K.M. & NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. *J. Soil Sci.*, 36:199-207, 1985.
- CROSS, A.F. & SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 64:197-214, 1995.
- DALLA ROSA, A. Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo – solo Santo Ângelo (LDR). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981. 136p. (Tese de Mestrado)
- DALLA ROSA, A.; MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Produtividade do trigo e da soja em sistemas de culturas e preparos de solo. *Trigo Soja*, 113:14-18, 1991.
- DEAN, L.A. Distribution of the forms of soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 2:223-227, 1937.
- DENARDIN, E. & KOCHHANN, R.A. Efeito de diferentes sistemas de preparo do solo no rendimento da cevada e na população de insetos subterrâneos. Passo Fundo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1998. 28p. (Relatório Técnico Anual)
- DICK, W.A. & TABATABAI, M.A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. *J. Environ. Qual.*, 6:82-85, 1977.
- GUO, F. & YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Sci.*, 163:822-833, 1998.
- HAGGAR, J.P.; WARREN, G.P.; BEER, J.W. & KASS, D. Phosphorus availability under alley cropping and mulched and unmulched sole cropping systems in Costa Rica. *Plant Soil*, 137:275-283, 1991.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B. & CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:970-976, 1982.
- KROTH, P.L. Disponibilidade de fósforo no solo para plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membrana. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 168 p. (Tese de Mestrado)
- MAGIG, J. Vegetation effects on phosphorus fraction in set-aside soils. *Plant Soil*, 149:111-119, 1993.
- McKEAN, S.J. & WARREN, G.P. Determination of phosphate desorption characteristics in soils using successive resin extractions. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 27:2397-2417, 1996.
- MERTEN, G.H. Rendimento de grãos e distribuição do sistema radicular das culturas sob diferentes sistemas de manejo em um Oxissolo (LDR). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988. 178p. (Tese de Mestrado)
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, 27:31-36, 1962.

- RHEINHEIMER, D.S. & ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. *Pesq. Agroec. Bras.* (enviado para publicação, 1999)
- SANYAL, S.K. & DATTA, S.K. Chemistry phosphorus transformation in soil. *Adv. Soil Sci.*, 16:1-120, 1991.
- SCHMIDT, J.P.; BUOL, S.W. & KAMPRATH, E.J. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivation: fractionation analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1168-1172, 1996.
- SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P. & FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Till. Res.*, 44:23-34, 1997.
- SENGANFREDO, M.L. Sistemas de culturas adaptadas à produtividade do milho e conservação do solo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1995. 100p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, F.C. & RAIJ, B.van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:267-288, 1999.
- SMILEY, R.W. Rhizosphere pH as influenced by plants, soils, and nitrogen fertilizers. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:795-801, 1974.
- TESTA, V.M. Características químicas de um solo Argissolo Vermelho distrófico Típico, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989. 146 p. (Tese de Mestrado)
- TIESSEN, H.; STEWART, W.B. & COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:853-858, 1984.
- ZHANG, T.Q. & MacKENZIE, A.F. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn monoculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:485-493, 1997.